

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA A VYUŽITÍ VODNÍHO PAPRSKU V TECHNOLOGII OBRÁBĚNÍ.

ANALYSIS OF WATER JET IN MACHINING TECHNOLOGY.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL KMENTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Michal Kmenta

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza a využití vodního paprsku v technologii obrábění.

v anglickém jazyce:

Analysis of water jet in machining technology.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Rešerše literatury k danému tématu.
2. Používaná výrobní zařízení - popis, funkce, princip.
3. Podmínky využití při obrábění.
4. Porovnání s konvenčními způsoby obrábění.
5. Závěr.

Cíle bakalářské práce:

Přehled, principy, podmínky použití vodního paprsku při obrábění, porovnání s konvenčními způsoby obrábění.

Seznam odborné literatury:

1. ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
2. ZEMČÍK, O. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6
3. KÖNIG, W. Fertigungsverfahren band 1, 2, 3, 4, 5, 6. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1999. 416 s. ISBN 3-18-401054-6
4. DVOŘÁKOVÁ, J. a DVOŘÁK, J. Technologie WJM/AVJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II. Technika, technologie - vydání 15/2008. Dostupné na <<http://www.glassrevue.com/news.asp?nid=6709&cid=6>>
5. HÜGEL, H. Strahlwerkzeug Laser. Einführung. Stuttgart: B. G. Taubner, 1992. 357 s. ISBN 3-519-06134-1
6. REICHARD, A. Fertigungstechnik 1, 2. 10. Aufl. Hamburg: Handwerk und technik, 1993. 420 s. ISBN 3-582-02311-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 10.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na základní rozbor a popis vodního paprsku. Obsahuje charakteristiku technologie řezání a dělení materiálu vodním paprskem, rozdíly mezi čistým a abrazivním vodním paprskem a jejich parametry. Důležitou částí je také porovnání s jinými metodami obrábění. V závěru se práce věnuje trendům a vývoji technologie vodního paprsku a příkladům technologické aplikace.

Klíčová slova

Technologie vodního paprsku, řezání a dělení materiálu, nekonvenční a progresivní metody obrábění, abrazivní dělení materiálu.

ABSTRACT

The thesis deals with the basic analysis and description of water jet machining. It contains characterization of cutting technology and material removal with water jet technology, differences between clean and hydroabrasive water jet and their parameters. The important part is also comparison with other unconventional cutting methods. In the end the thesis is devoted to the trends and the development of water jet technology and to examples of technological application.

Key words

Water jet technology, cutting and material removal, unconventional and progressive cutting methods, material removal with abrasive.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KMENTA, Michal. *Analýza a využití vodního paprsku v technologii obrábění: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 42s., příloh 5. Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „*Analýza a využití vodního paprsku v technologii obrábění*“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

28.5.2009

.....
Michal Kmenta

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Ryškovi a firmě E-COM ve Slavkově u Brna za umožnění návštěvy podniku a panu Skoupému za ukázkou práce na zařízení pro řezání vodním paprskem, což mi pomohlo při vypracování této bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod.....	8
1 CHARAKTERISTIKA A ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU.....	9
1.1 Princip řezání vodním paprskem.....	10
1.2 Rozdělení technologie dle pracovního média.....	10
1.3 Rozbor pracovního zařízení.....	12
1.3.1 Řídicí systém.....	13
1.3.2 Hydraulická jednotka.....	15
1.3.3 Řezací hlava.....	18
1.3.4 Pneumatická jednotka.....	19
1.3.5 Doprava abraziva.....	20
1.3.6 Pracovní stůl.....	21
2 VLIVY PŮSOBÍCÍ NA PROCES DĚLENÍ MATERIÁLU.....	22
2.1 Tlak paprsku.....	22
2.1.1 Startovací tlak.....	22
2.1.2 Pracovní tlak.....	23
2.2 Vzdálenost trysky od řezaného materiálu.....	23
2.3 Rychlost posuvu.....	24
3 POROVNÁNÍ S JINÝMI METODAMI DĚLENÍ MATERIÁLU.....	25
4 VYUŽITÍ V PRAXI.....	27
4.1 Využití podle odvětví.....	27
4.1.1 Strojírenský průmysl.....	27
4.1.2 Stavební průmysl.....	29
4.1.3 Chemický průmysl.....	30
4.1.4 Jaderný průmysl.....	30
4.1.5 Sklářský průmysl.....	30
4.1.6 Gumárenský průmysl.....	30
4.1.7 Papírenský průmysl.....	31
4.1.8 Elektrotechnický průmysl.....	31
4.1.9 Obuvnický průmysl.....	31
4.1.10 Umělecká oblast.....	31
4.1.11 Kosmický průmysl.....	31
4.2 Technologické parametry.....	31
4.3 Řezané materiály.....	32
4.4 Exkurze v podniku E-COM.....	33
5 VÝVOJ A TRENDY TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU.....	34

Závěr.....	39
Seznam použitých zdrojů.....	40
Seznam příloh.....	42

ÚVOD

Technologie vodního paprsku patří ve strojírenství mezi nekonvenční technologie, které se začaly vyvíjet v druhé polovině minulého století a využívají buď běžné formy energie novým způsobem anebo používají energii novou.

Síla kapalinového paprsku působí v přírodě od počátku existence Země. Systematický výzkum využití energie kapalinového proudu k porušování materiálu a cílené uplatňování výsledků tohoto výzkumu v praxi bylo zahájeno zhruba v padesátých letech minulého století v USA především z důvodu řezání netradičních materiálů používaných při stavbě raketoplánů. Využití energie proudící kapaliny v těžebním průmyslu se ovšem objevovalo již dříve. V šedesátých a sedmdesátých letech minulého století se přidal výzkum abrasivních příměsí a v osmdesátých letech byla technologie abrazivního kapalinového paprsku konečně vyvinuta.

Tato technologie využívá mechanické energie v soustředěném vodním sloupci na opracování či dělení materiálu bez použití nástroje, který by měl přímý kontakt s obrobkem. Pomocí extrémního tlaku můžeme tenkým vodním paprskem obrábět téměř jakýkoliv materiál. V technické praxi se využívá především k dělení materiálu. Největší výhodou je zřejmě nulové tepelné ovlivnění oblasti řezu. Technologie je velmi univerzální a má dnes široké využití.

1 CHARAKTERISTIKA A ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

První kapitola se zaměřuje na vysvětlení pojmu nekonvenční technologie obrábění, na principy technologie vodního paprsku a na rozbor pracovního zařízení.

Vysvětlení pojmu nekonvenční technologie obrábění

Pojmem nekonvenční technologie obrábění se myslí soubor technologií, které pro úběr materiálu využívají jiné formy energie než mechanické. Můžeme se také setkat s pojmem netradiční, progresivní, speciální technologie či metoda obrábění. Při těchto metodách nedochází obecně k přímému kontaktu nástroje s materiálem. Úběr je obecně řešen erozí materiálu, čímž dochází k obrušování nebo dělení materiálu. Mezi tyto moderní metody se řadí i vodní paprsek, který má v praxi široké využití.

Aby si čtenář udělal lepší představu, o jakém zařízení je tato práce, na následujícím obrázku je příklad moderního CNC stroje pro dělení materiálů technologií vodního paprsku od firmy AWAC, spol. s.r.o. (obr. 1.1).



Obr. 1.1 CNC stroj AQUACUT pro dělení materiálů vodním paprskem (2)

1.1 Princip řezání vodním paprskem

Princip řezání materiálu s využitím vodního paprsku spočívá v dopadu velmi úzkého a rychlého proudu vody na opracováváný materiál. Proud vody může být doplněn přidáním abraziva.

1.2 Rozdělení technologie dle pracovního média

Technologie řezání vodním paprskem se dělí na dvě základní kategorie:

- **WJM – Water Jet Machining** – vodní paprsek bez přídavku abraziva, tzv. hydrodynamické obrábění – pro měkké, tenké materiály
- **AWJ – Abrasive Waterjet (Machining)** – vodní paprsek s přídavkem abraziva, tzv. hydroabrazivní vodní paprsek – pro tvrdší, odolnější a silnější materiály

WJM – vodní paprsek bez přídavku abraziva

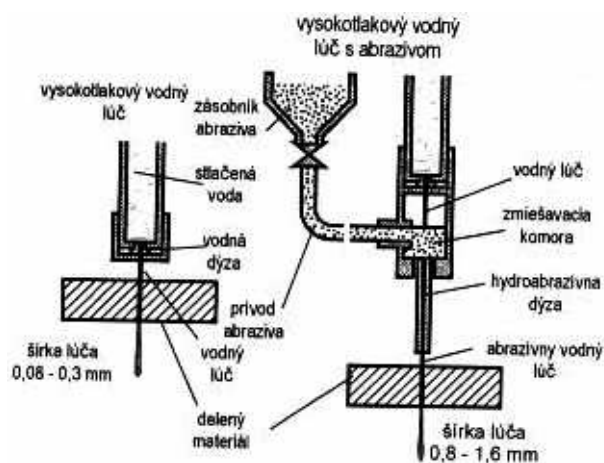
Vysokotlaké vodní čerpadlo s pomocí multiplikátoru generuje tlak vody a ta je tlakovým potrubím dopravena k řezací hlavě. Řezný účinek oproti metodě AWJ je nižší, proto je tato metoda vhodná k řezání měkčích materiálů jako jsou například tvrzený papír, plasty, koberce, molitany, kůže a další.

AWJ – vodní paprsek s přídavkem abraziva

Princip této metody je obdobný jako u WJM. Vysokotlaké vodní čerpadlo s pomocí multiplikátoru generuje tlak vody a ta je tlakovým potrubím dopravena k řezací hlavě. Řezný účinek oproti metodě WJM je vyšší, proto se tato metoda lépe hodí k řezání tvrdších materiálů. Hodí se k řezání jak tenkých fólií tak i silných desek.

Při dělení materiálu pomocí technologie AWJ se využívá principu erozivního procesu. Zjednodušeně spočívá řezání v obroušování obráběného materiálu abrazivními částicemi obsaženými v kapalném médiu. Tlak kapalinového paprsku se pohybuje kolem 400 MPa. Abrazivo je přiváděno ze zásobníku do směšovací komory. Smíchá se s proudící kapalinou a proud je usměrněn do úzkého paprsku v trysce. Řezná účinnost je vysoká. S touto metodou se v praxi setkáme častěji. (9)

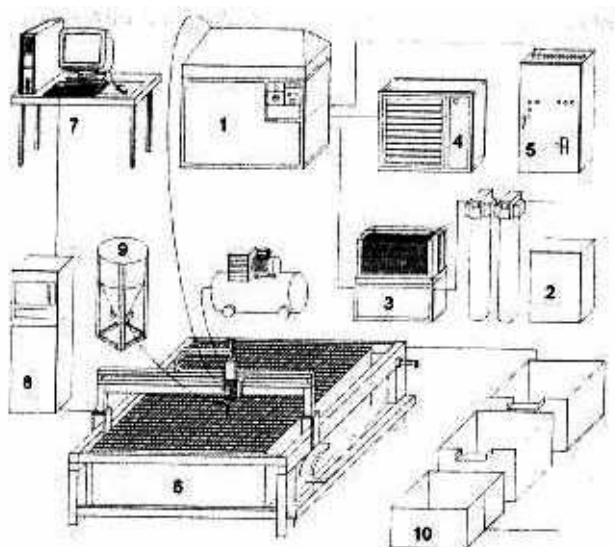
Rozdílné konstrukce trysek si můžeme všimnout na následujícím obrázku (obr. 1.2).



Obr. 1.2 Principy konstrukce trysek pro řezání bez abraziva (nalevo) a s abrazivem (napravo) (12)

1.3 Rozbor pracovního zařízení

Zařízení pro řezání vodním paprskem obsahuje mnoho částí. Tato podkapitola obsahuje jejich stručný přehled. Na následujícím obrázku je nejprve schéma zařízení (obr. 1.3).



Obr. 1.3 Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem (2)

- 1 vysokotlaké čerpadlo
- 2 jednotka na změkčení vody
- 3 jednotka na filtraci vody
- 4 chladicí jednotka
- 5 elektrorozvaděč
- 6 řezací stůl s lapačem
- 7 grafické pracoviště
- 8 řídicí systém
- 9 násypka a dávkovač abraziva
- 10 odkalovací systém

1.3.1 Řídicí systém

Řídicí systém přenáší tvar řezu, který je navržen přes počítač, do pohybu trysky a tím automatizuje proces (obr. 1.5 a 1.6). Z některého z CAD programů se výkresová předloha přenesla do CAD/CAM systému, který je kompatibilní se systémem CNC. K dispozici je databáze obsahující standardní parametry pro velké množství materiálů a výpočetní software určí odpovídající řezné parametry a optimalizuje program. Může mít i další výhody, jakými jsou například dopočítávání a korekce při opotřebení trysky. Použitý program si můžeme uložit a vracet se k němu, případně ho upravit. Pro počáteční ustavení nulového bodu využijeme ruční ovládání na panelu samotného stroje (obr. 1.4). Tím ustavíme nulový bod a dále jede stroj podle přednastaveného programu automaticky. Důležitým prvkem softwaru je simulace. Daný program se odsimuluje na počítači a zjistí se případné chyby, kdy by mohla tryska narazit do materiálu a poškodit se tak. Dále můžeme stroj spustit i bez přísunu vody a abraziva a vidíme tak dráhy pohybu. Teprve, až si budeme jisti bezpečným chodem, můžeme zahájit samotné řezání.



Obr. 1.4 Ruční řídicí panel stroje pro řezání vodním paprskem ve slavkovské firmě E-COM



Obr. 1.5 Řídicí počítač ve slavkovské firmě E-COM



Obr. 1.6 Hardware řídicího systému ve slavkovské firmě E-COM

1.3.2 Hydraulická jednotka

K vytvoření vysokotlakého kapalinového paprsku je zapotřebí komplexní hydraulická jednotka, která se skládá z mnoha jednotlivých částí:

Vysokotlaké olejové čerpadlo (obr. 1.7) – generuje tlak oleje. Poháněno elektromotorem. Maximální tlak se pohybuje okolo 20 MPa (9,15). Z důvodu údržby, například kontroly a případné výměny těsnění u multiplikátoru, kdy je potřeba čerpadlo vypnout, je k provozu nachystáno záložní čerpadlo. Příkon čerpadla se pohybuje od 11 do 150 kW a průtok vody od 1,2 do 7,6 l/min (4,13).



Obr. 1.7 Čerpadlo ve slavkovské firmě E-COM

Multiplikátor (obr. 1.8) – převádí sílu nízkotlakého oleje na vysokotlakou vodu. Na multiplikátory je možné připojit i několik řezacích hlav. Multiplikátory lze párovat pro dosažení ještě vyšších tlaků. Tlak se zesílí přibližně 20x na hodnotu okolo 400 MPa (9).



Obr. 1.8 Multiplikátor ve slavkovské firmě E-COM

Akumulátor – vysokotlaká nádoba zařazená za multiplikátorem a určená k tlumení hydraulických rázů, které jsou způsobeny pulzací tlaku jako důsledku stlačení vody, a k udržení rovnoměrného tlaku a rychlosti proudící kapaliny. (12)

Uzavírací vysokotlaký ventil – umožňuje okamžité zastavení průtoku vysokotlaké kapaliny.

Vysokotlaké potrubí – zajišťuje přenos kapaliny. Vyrobeno z korozivzdorné oceli. Vnější průměry potrubí jsou v rozmezí 6-12 mm a vnitřní průměry jsou v rozmezí 1-4 mm. (22)

Filtry – jejich úkolem je odchyťovat z kapaliny nečistoty, které by jinak mohly způsobit poškození zařízení, především trysky. Filtrační rozsah je 0,5 až 10 μm (obr. 1.10) (12). Filtry se dělí na nízkotlaké a vysokotlaké. Nízkotlaké filtry jsou z bavlny nebo syntetických vláken. Vysokotlaké filtry jsou kovové. (16)



Obr. 1.9 Filtrace a chemická úprava vody (2)



Obr. 1.10 Vodní filtry (16)

Postupně se jedná o filtry 10 um PP010, 5 um PP005, 1 um PP001, 0,5 um PP000,5.

V přílohách se nachází příklad v současnosti nabízeného čerpadla firmy PTV s.r.o.

1.3.3 Řezací hlava

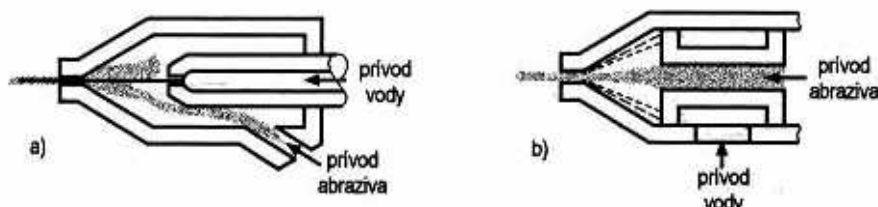
Pracovním nástrojem zařízení pro řezání vodním paprskem je řezací hlava s tryskou.

Podle kategorie řezání bez a s využitím abraziva dělíme konstrukce následovně:

- **Konstrukce pro řezání technologií WJM** – řezací hlava bez směšovací komůrky.
- **Konstrukce pro řezání technologií AWJ** – řezací hlava se směšovací komůrkou. V ní díky podtlaku vytvořenému proudící kapalinou dochází k přimíchávání abraziva do proudu tryskajícího na obráběný povrch.

Konstrukční možnosti přívodu abraziva dělíme dále na: (obr. 1.11)

- **Dýza s radiálním (bočním) přívodem abraziva** – jednodušší výroba oproti axiálnímu přívodu, přívod abraziva lze vypnout, čímž získáme čistý vodní paprsek. Nevýhodou ovšem je rychlejší opotřebení trysky.
- **Dýza s axiálním (centrálním) přívodem abraziva** – výhodou oproti radiálnímu přívodu je lepší mísení abraziva s vodou, čímž se sníží opotřebení dýzy. (12)



Obr. 1.11 Schémata obou principů přívodu abraziva u dýzy pro technologii AWJ (19)
a) dýza s radiálním přívodem abraziva
b) dýza s axiálním přívodem abraziva

V praxi se při řezání více používá systému radiálního (bočního) přívodu abraziva. Systém axiálního (centrálního) přívodu abraziva se využívá pro odstraňování starých nátěrů a čištění například potrubí, cisteren apod.

Řezací hlavy mají samostředící systém uchycení. Zapínání proudu paprsku je řešeno pomocí pneumatického ventilu. V praxi se často využívá více řezacích hlav najednou (obr. 1.12). Pro šikmé řezání se používá speciální řezací hlava, kterou lze dokoupit zvlášť.



Obr. 1.12 Příklad zařízení s více řezacími hlavami (24)

Tryska velmi ovlivňuje kvalitu řezu. Výtokový otvor s průměrem od 0,075 do 1,5 mm je vyroben ze safíru, spékaného karbidu, karbidu nitridu bóru, korozivzdorné oceli nebo diamantu. Ten je sice dražší, ale má vyšší životnost. Trysky se časem zanáší nečistotami a minerálními usazeninami a je potřeba je pravidelně čistit a měnit.

Průměr paprsku se pohybuje u technologie WJM kolem 0,2 mm a u technologie AWJ obvykle v rozmezí od 0,8 do 1,6 mm. Aktuální průměr paprsku ovlivňuje velikost opotřebení. (15,22)

1.3.4 Pneumatická jednotka

Jedná se o kompresor se stlačeným vzduchem. Pneumaticky se například ovládá doprava abraziva nebo uzavírání trysky.

1.3.5 Doprava abraziva

Abrazivo se pomocí stlačeného vzduchu posouvá ze zásobníku potrubím do dávkovačů (obr. 1.13). Dávkování je řízeno elektronicky (obr. 1.14).



Obr. 1.13 Zásobník abraziva ve slavkovské firmě E-COM

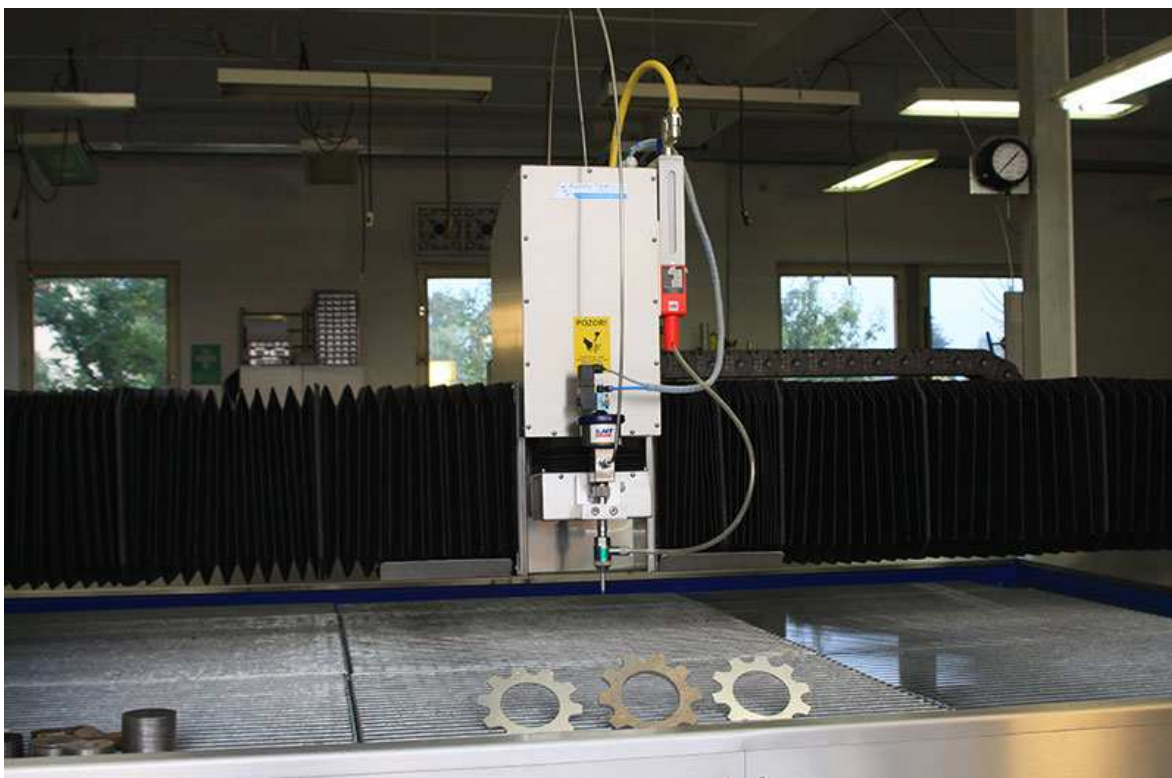


Obr. 1.14 Odkrytý podavač abraziva ve slavkovské firmě E-COM

1.3.6 Pracovní stůl

Pracovní stůl z oceli má pevnou a tuhou konstrukci. Rozměry stolů se pohybují v délce od 3000 do 18000 mm a v šířce od 1500 do 5000 mm (2). Pod stolem se nachází tzv. lapač neboli zachytávač vodního paprsku.

Na následujícím obrázku si můžeme všimnout výměnných roštů na řezacím stole, ty se opotřebovávají a postupně vyměňují, dají se i přeskládat mezi sebou, pokud se například řeže většinou nad jednou polovinou stolu (obr. 1.15).



Obr. 1.15 Řezací stůl s výměnnými rošty (25)

V přílohách se nachází příklad v současnosti nabízeného CNC stolu vyráběného firmou PTV s.r.o.

2 VLIVY PŮSOBÍCÍ NA PROCES DĚLENÍ MATERIÁLU

Proces řezání a dělení materiálu je ovlivňován mnoha faktory. Ty ovlivňují ať už více či méně výslednou kvalitu a rychlost řezu. Podle geometrických a mechanických vlastností obráběného materiálu a podle toho, jakou chceme mít výslednou kvalitu řezné hrany a tvarovou a rozměrovou přesnost, volíme technologické parametry, které jsou následující:

- průměr trysky
- geometrie trysky
- tlak paprsku
- volba abraziva a jeho množství
- rychlost posuvu
- přesnost polohování

2.1 Tlak paprsku

Neustále rostoucí dosažitelný tlak vody dodává technologii progresivitu. Obecně platí, že čím vyšší tlak, tím hlubší řez. V pracovním procesu se používají především dva tlaky, které volíme podle použití. Jsou to startovací a pracovní tlak.

2.1.1 Startovací tlak

Startovací neboli také nastřelovací tlak slouží k tzv. nastřelení materiálu, kdy paprsek prořízne díru skrz celou hloubku materiálu. Z tohoto bodu se pak posouvá již s menším tlakem. Pro tzv. nastřelování se používají dvě metody, které volíme především podle druhu řezaného materiálu:

– **Stacionární metoda** – paprsek vody je soustředěn do jednoho bodu, dokud nevytvoří díru skrz celý materiál. Používá se spíše u houževnatých materiálu, kdy vyšší tlak u této metody materiál nepoškodí.

– **Rotační metoda** – paprsek se nechá rotovat po kružnici (průměr kolem 1 mm) a provrtává se tak skrz materiál. Odbroušený materiál má prostor vyplachovat se ven. Tato metoda se používá pro tvrdší, ale křehčí materiály a je rychlejší. Například se hodí pro sklo nebo keramiku, které by stacionární metoda mohla roztříštit. V praxi se u této metody pro křehké materiály využívá hodnoty tlaku okolo 110 MPa (18).

Mohou ovšem nastat případy, kdy nám nevyhovuje ani jedna z těchto metod. U laminátových a sendvičových materiálů může dojít při nastřelování k delaminaci vrstev. V takovýchto případech se postupuje tak, že daný materiál se nejprve předvrtá, čímž se vytvoří výchozí díra pro další pohyb vodního paprsku. Nástroj pro navrtání výchozí díry může být umístěn vedle řezací hlavy pro vodní paprsek.

2.1.2 Pracovní tlak

Při vyšším tlaku vody se dosáhne hlubšího řezu a vyššího úběru materiálu. Z pokusů pana inženýra Slaného (2006) vyplývá, že jako nejefektivnější hodnota tlaku se jeví 380 MPa. (18)

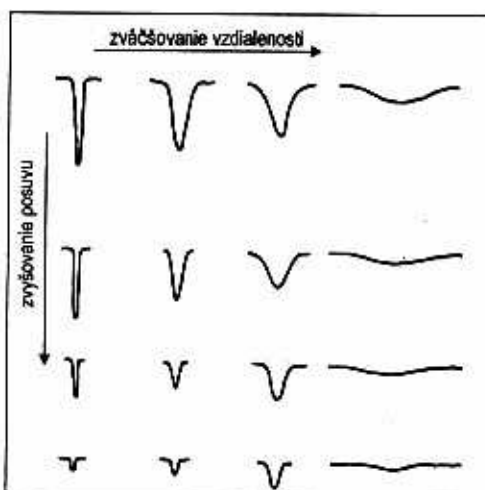
2.2 Vzdálenost trysky od řezaného materiálu

Vzdálenost od povrchu řezaného materiálu u technologie WJM se poměrně liší od obvyklé vzdálenosti pro technologii AWJ.

U řezání technologií AWJ, čili s abrazivem, se doporučuje vzdálenost od povrchu řezaného materiálu co nejmenší samozřejmě ale s ohledem na bezpečný pohyb trysky nad materiálem, neboť by mohlo hrozit riziko uražení trysky. Řezná mezera mezi tryskou a materiálem se pohybuje do 5 mm, ideálně však kolem 2 mm (18). Zvýšení vzdálenosti nejenže snižuje efektivitu procesu, ale mělo by dokonce škodlivý účinek v podobě zhoršení kvality řezu. A vzhledem k rostoucímu rozptylu abraziva by byl řez i širší.

U řezání technologií WJM, čili čistou vodou bez abraziva, je řezná mezera větší a to okolo 20 mm (22). Souvisí to především s jinou konstrukcí trysky.

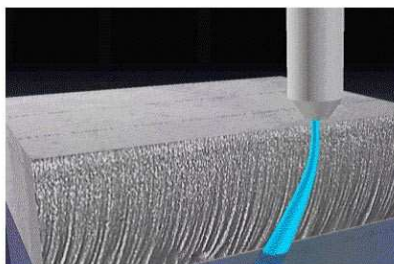
Závislost hloubky řezu na vzdálenosti trysky od povrchu, ale také na rychlosti posuvu, můžeme vidět na následujícím obrázku. Lze z něj vyčíst, že čím menší vzdálenost trysky od povrchu a čím menší posuvová rychlost, tím hlubší řez dostaneme (obr. 2.1).



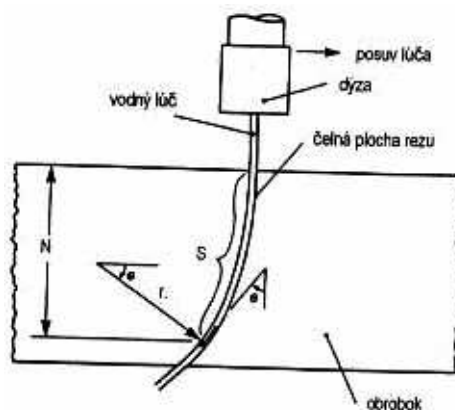
Obr. 2.1 Závislost hloubky řezu na rychlosti posuvu a vzdálenosti trysky od povrchu
(7)

2.3 Rychlost posuvu

Rychlost posuvu značí rychlost pohybu trysky vůči řezanému materiálu. Při řezání dochází k tzv. váznutí paprsku, neboť ten při průchodu materiálem ztrácí svou energii a odklání se od své osy, čímž vznikají na řezné hraně zřetelné rýhy (obr. 2.2 a 2.3). Změnou rychlosti posuvu můžeme ovlivnit následující parametry: hloubku řezu, šířku a tvar řezné spáry a kvalitu povrchu.



Obr. 2.2 Váznutí paprsku v materiálu a zřetelné rýhování řezné hrany (26)



Obr. 2.3 Váznutí paprsku v materiálu schématicky (20)

Při pomalejším posuvu se paprsek logicky prořízne hlouběji do materiálu (obr. 2.1). Podle tloušťky, kterou chceme řezat tedy nastavujeme rychlost posuvu. Ostatní parametry, jako jsou tlak, průměr trysky a vzdálenost trysky od řezaného materiálu, zůstávají často konstantní a mění se jen, když je to důležité, především při změně druhu řezaného materiálu.

Šířka řezné spáry se s rychlejším posuvem zužuje a drsnost povrchu na řezné hraně se zvyšuje. Šířka spáry pro technologii WJM se pohybuje okolo 0,1 mm a pro technologii AWJ běžně v rozmezí 0,8 - 2,5 mm (4,17). Nejlepší povrch získá drsnost kolem $R_a 3,2$. Řezná plocha se ovšem často dále opracovává a není tedy třeba se tímto příliš zabývat. Pomalejší posuv by totiž způsobil především nežádoucí zdražení výroby.

3 POROVNÁNÍ S JINÝMI METODAMI DĚLENÍ MATERIÁLU

Důvodů, proč se přechází na vodní paprsek, je více. Řeže téměř jakýkoliv materiál, má širší oblast využití a co je také velmi důležité, cena této technologie je poměrně velmi příznivá. Například oproti zařízení pro řezání laserem, které stojí až 15 mil. Kč, se cena zařízení pro řezání vodním paprskem pohybuje obvykle v rozmezí 2,5 - 3,5 mil. Kč. Obě tyto metody, jak vodní paprsek tak laser, používají k řezání materiálu tenký paprsek. U technologie vodního paprsku je materiál odbrušován a unášen z řezné spáry. U laseru je materiál roztaven a odpařován. Při řezání laserovým paprskem tedy může u určitých materiálů docházet k odpařování řezaného materiálu. To mohou ovšem být nebezpečné, jedovaté plyny, například při řezání hliníkových plechů. Při použití technologie vodního paprsku není třeba odpařování řezaného materiálu vůbec uvažovat. Oproti laseru má technologie vodní paprsku mnohem lepší účinnost (okolo 85% proti 10%) (3). Laser je sice rychlejší, má ovšem různá omezení a požadavky na řezaný materiál, především na chování materiálu při zahřátí nad teplotu tavení. Další nevýhodou technologie laserového řezání je omezení rozměrů CNC stolu. U technologie WJM a AWJ jsou rozměry stolu prakticky neomezeny.

Prodej zařízení pro technologii AWJ a WJM každým rokem stoupá. Hodně velkých firem přechází na tuto technologii, což ovšem škodí podnikům, které se zabývají čistě technologií vodního paprsku. Těm potom ubývá zakázek.

Technologie AWJ a WJM nemá mnoho nevýhod. Jednou z hlavních ovšem je koroze řezné hrany v určitých korozivních materiálech. Možností, jak toto vyřešit, je použití jiného řezného média, případně se dají hrany brousit.

Porovnáním s ostatními nekonvenčními technologiemi obrábění se věnují následující dvě tabulky (tab 3.1 a 3.2).

Tab. 3.1 Některé technologické parametry vybraných nekonvenčních metod obrábění (27)

Metoda/Parametr	Drsnost Ra (μm)	Stupeň přesnosti IT	Hloubka ovlivněné vrstvy (μm)	Úběr (cm ³ .min ⁻¹)	Měsná spotřeba energie (kWh.cm ⁻³)
Elektrojiskrové obrábění	50 - 0.2	6 - 12	10 - 300	10 ⁻⁴ - 0.6	0.1 - 1
Obrábění paprskem laseru	50 - 6.3	6 - 12	6 - 12	10 ⁻² - 0.4	8 - 12
Obrábění paprskem elektronů	50 - 6.3		beze změn	10 ⁻² - 0.4	
Obrábění paprskem plazmy	50 - 6.3		500 - 800	100	
Elektrochemické obrábění	2.5 - 1.6	9 - 12	beze změn	0.05 - 0.5	0.1 - 0.3
Elektrochemické broušení	0.8 - 0.2	6 - 9	beze změn	2 - 10	0.04 - 0.08
Ultrazvukové obrábění	6.3 - 0.4	7 - 9	beze změn	10 ⁻² - 10	0.07 - 0.8
Obrábění vodním paprskem	3.2	7 - 9	beze změn		

Tab. 3.2 Vhodnost použití vybraných nekonvenčních metod obrábění na některé materiály (12)

Materiál obrobku/ Technologie	USM	WJM	AJM	AWJ	CHM	EDM	EBM	LBM
Kovové materiály								
Hliník	3	2	2	1	1	2	2	2
Hořčík	2	2	2	1	1	1	2	2
Vysokoleg. ocel	3	1	1	1	2	1	2	2
Titan	2	1	2	1	2	1	2	2
Žárupevné oceli	1	1	1	1	3	1	1	3
Nekovové materiály								
Keramika	1	1	1	1	3	4	1	1
Plasty	2	2	2	1	3	4	2	2
Kompozitní materiály	1	1	1	1	2	4	2	2
Výbušné látky	4	1	4	1	4	4	4	4
Celkové hodnocení	2.1	1.3	1.8	1	2.3	2.4	2	2.2

Vysvětlivky:

1 – nejvhodnější použití ... 4 – nevhodné použití

USM = obrábění ultrazvukem

WJM = obrábění čistým vodním paprskem

AJM = obrábění proudem abraziva

AWJ = obrábění abrazivním vodním paprskem

CHM = chemické obrábění

EDM = elektrojiskrové obrábění

EBM = obrábění elektronovým paprskem

LBM = obrábění laserem

Z druhé tabulky lze vyhodnotit, že metoda abrazivního vodního paprsku se hodí na největší množství různých materiálů.

Ve srovnání s třískovým obráběním má řezání vodním paprskem přes všechny výhody a možnosti jistá omezení. Maximálně dosažitelná přesnost rozměrů ($\pm 0,1$ mm), tvarů a jakost povrchu obrobené plochy zaostávají za frézováním či soustružením. Kapalinovým paprskem nelze pracovat v libovolném směru. Nicméně i přesto je technologie dobře využitelná a v mnoha případech tvoří v praxi řezání kapalinovým paprskem a třískové obrábění ideální kombinaci. (11,17)

4 VYUŽITÍ V PRAXI

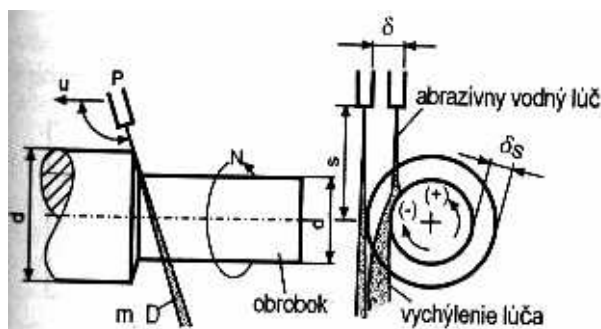
Technologie vodního paprsku má velmi široké využití. Pomáhá tomu i její ekologičnost. Zařízení se liší podle podmínek, které dané odvětví vyžaduje. Zařízení mohou být v případě potřeby i mobilní a lze je používat i ve venkovních prostorách. Při používání nevznikají žádné škodlivé výpary a nepotřebujeme tedy odsávání.

4.1 Využití podle odvětví

4.1.1 Strojírenský průmysl

Ve strojírenském průmyslu má technologie vodního paprsku zřejmě nejširší využití. Především se jedná o dělení a tvarové vyřezávání různých materiálů. Dále lze pomocí vodního paprsku soustružit, frézovat, vrtat, vyvrtávat, řezat závit, otryskávat, matovat, zdrsňovat a vytvrzovat povrch, odstraňovat otěpy a nežádoucí povlaky nebo nátěry. (28)

Při **soustružení** se abrazivní paprsek přisouvá v axiálním směru k ose rotujícího obrobku (obr. 4.1). Velikost úběru je nastavena radiálním přísunem.



Obr. 4.1 Schéma soustružení vodním paprskem (14)

Při **frézování** dochází sice k řezání, ale ještě ne k dělení materiálu. Abrazivní paprsek opakovaně přechází přes obráběnou plochu, dokud není dosaženo požadovaného tvaru. Můžeme obrábět i tvarově složité obrobky, jako jsou licí formy a tvarové skořepiny a dále například tvářecí nástroje. (28)

Při **vrtání a vyvrtávání** existuje několik metod. Může být stacionární jak obrobek tak paprsek nebo je stacionární jen obrobek a paprsek rotuje nebo kmitá. Technologii vrtání a vyvrtávání abrazivním vodním paprskem využijeme především u jinak těžko obrobitelných materiálů jako jsou keramika, niklové slitiny, sklo (nekalené) atd. (obr. 4.2 a 4.3)



Obr. 4.2 Vodní paprsek při vrtání děr ve slavkovské firmě E-COM



Obr. 4.3 Ukázky výřezků z plechu ve slavkovské firmě E-COM s využitím metody vrtání vodním paprskem

V automobilovém průmyslu se pomocí vodního paprsku například vyřezávají čelní skla, střešní obložení, klingerová těsnění. Jak je v automobilovém průmyslu obvyklé, využívá se hodně robotických ramen. Na jejich koncích jsou řezací hlavice.

Své uplatnění nacházejí i mobilní zařízení na **čištění tlakovou vodou**, například pro čištění nánosů barev v lakovnách nebo pro čištění nádrží, cisteren apod. (obr. 4.4 a 4.5)



Obr. 4.4 Příklad aplikace zařízení pro čištění nádrží vysokotlakou vodou (29)



Obr. 4.5 Náčrt spouštěného zařízení pro čištění nádrže vysokotlakou vodou (29)

4.1.2 Stavební průmysl

I zde najde technologie vodního paprsku své uplatnění. Používá se například pro obnažování železobetonových konstrukcí, mikrotunelování (podvrtávání komunikací), sanaci zdiva a překladů, odstraňování nátěrových hmot, čištění atd.

Mikrotunelování je technologie, kterou využijeme při podvrtávání komunikací, například pro vedení kabelů. Při této práci dokonce není potřeba přerušovat dopravu na komunikaci.

Při **sanaci zdiva a překladů** má technologie vodního paprsku své nesporné výhody. Místo prachu se zachytává do sběrného zařízení aerosol a transformuje na kalovou vodu. Oproti použití kladiv a dalších bouracích zařízení jsou potlačeny nežádoucí vibrace, které by mohli poškodit statiku stavby. A v neposlední řadě je řez přesnější než u jiných používaných technologií.

Při **čištění** například nátěrových hmot, ale i prachu je také moderní využívat vody. K tomu slouží mobilní zařízení na čištění tlakovou vodou (obr. 4.6 a 4.7). Můžeme odstraňovat staré nátěry ze stavebního materiálu, například traverz, nebo čistit vozovky. Často používaná metoda pískování má nevýhodu v tom, že opískovaný železný povrch může být poškozen natolik, že začne korodovat. Proud vody povrchovou vrstvu tolik nenarušuje.



Obr. 4.6 Ukázka vodního čerpadla firmy Hammelmann integrovaného do automobilu (29)



Obr. 4.7 Ukázka mobilního vodního čerpadla firmy Hammelmann (29)

4.1.3 Chemický průmysl

Zde je nezastupitelné využití především při rušení staré munice.

4.1.4 Jaderný průmysl

Dekontaminace a odstraňování ochranných železobetonových vrstev v jaderných elektrárnách, dále odstraňování usazenin a další čištění. (12)

4.1.5 Sklářský průmysl

Řezání, vrtání, matování skla.

4.1.6 Gumárenský průmysl

Řezání gum, plastů i kevlarových vláken.

4.1.7 Papírenský průmysl

Řezání papírů, fólií, lepenky.

4.1.8 Elektrotechnický průmysl

Vyřezávání plošných spojů, řezání feritů, amorfních látek, magnetů.

4.1.9 Obuvnický průmysl

Řezání kůže, plastů.

4.1.10 Umělecká oblast

Gravírování – při této metodě pomocí technologie AWJ nedochází k prořezání celé tloušťky obrobku, ale pouze k odstranění povrchové vrstvy do určité požadované hloubky. Do obrobku je vytvarován umělecký reliéf, respektive je umělcem ještě dotvořen. (5)

4.1.11 Kosmický průmysl

Zde je technologie vodního paprsku nenahraditelná, neboť je potřeba řezat keramické materiály bez tepelného ovlivnění řezné hrany, což by mohlo způsobovat vznik mikrotrhlin vlivem zbytkových pnutí v obrobené ploše a tím nemožnost použití takovýchto výrobků do tak náročných podmínek, jaké nastávají při letu kosmické rakety apod.

4.2 Technologické parametry

Pro efektivní a ekonomické využití vodního paprsku, například při obrábění, je potřeba správně zvolit technologické parametry. Ty můžeme dělit na závislé a nezávislé:

- **Závislé** – jsou dány výsledkem obrábění:
 - kvalitativní parametry** – vlastnosti obrobeného povrchu, tepelně ovlivněná oblast.
 - kvantitativní parametry** – objemový úběr materiálu, topografie povrchu.
- **Nezávislé** – ovlivňují efektivnost procesu obrábění:
 - hydraulické parametry** – určují hydraulický výkon. Jde především o tlak vody, výtokový koeficient, průměr trysky, rychlost proudění.
 - abrazivní parametry** – neboli vlastnosti brusiva. Jsou závislé na vlastnostech obráběného materiálu jako je tvrdost, pevnost, modul pružnosti. Jsou to především materiál abraziva, velikost abrazivních částic, rychlost proudění abraziva.
 - směšovací parametr** – průměr a délka trysky.
 - parametry související se samotným obráběcím procesem**
 - posuv, vzdálenost trysky od obráběného povrchu, počet přechodů paprsku nad obráběnou plochou, dále při soustružení počet otáček obrobku a při frézování vedlejší přídavek posuvu.

4.3 Řezané materiály

Technologií vodního paprsku lze řezat téměř jakýkoliv materiál. Podmínkou je, aby řezaný materiál nebyl vodou znehodnocován. Pro řezání je nejvhodnější plošný materiál. Pokud je řezaný materiál povrchově upravován (leštěn, broušen, obarven, komaxitován apod.), mohou se použít fólie, které chrání proti poškození. Lze řezat téměř jakýkoliv tvar. Jediným omezením je zaoblení vnitřních rohů podle průměru paprsku.

Maximální tloušťku řezaného materiálu ovlivňuje především druh materiálu, geometrie řezu a požadovaná kvalita řezu. Při velmi nízkém posuvu (1 mm/min) lze řezat například korozivzdornou ocel až do hloubky 300 mm.

Lze řezat materiály přírodní i umělé, jednosložkové, vícesložkové, vrstvené (sendvičové), kompozitní, spékané, zhutňované, pěněné i vysoce tvrdé materiály, například všechny oceli, železo, hliník, dural, měď, hořčík, titan, mosaz, bronz, azbest, plasty, lamináty, sklo, drátosklo, plexisklo, lepené sklo, kámen, žulu, mramor, keramiku, porcelán, dřevo, dřevotřísky, překližku, lepenku, folie (například hliníkové folie o tloušťce i 0,1 mm), kůži, molitan, koberce, gumu, klingerit, textil, dokonce i výbušné látky a mnoho dalších materiálů. (9)

Nelze řezat kalené sklo. Velmi lehce se poškodí. (10)

4.4 Exkurze v podniku E-COM

Firma E-COM ve Slavkově u Brna vlastní mimo jiné zařízení pro řezání vodním paprskem. Zařízení typu MSNC 500W dodala firma AWAC z Prahy v roce 2002. Základem je 2D řezací stůl AWAC 3020A s rozměry roštu 3x2 m. Zařízení tehdy stálo okolo 3 mil. Kč. Čerpadlo (firmy Orlík-kompresory) má označení PKS 51/300 (výkon 30 k, max. pracovní teplota 100°C, max. pracovní tlak 1,1 MPa). Jako ovládací software jsou zde nainstalovány programy Mikrostep a Asper.

Stůl obsahuje 6 dílčích roštů, ty se podle potřeby prohazují mezi sebou a jednou za 2 měsíce se koupí jeden nový rošt za 700 Kč, neboť se časem poškozuji. Také jednou za měsíc se mění obě trysky. Malá, vodní vyjde na 500 Kč, velká, abrazivní na 5000 Kč. Jednou za dva měsíce se koná pravidelný servis zařízení a mění se těsnění. A jednou za rok se provádí generálka čerpadla, především se mění olejová náplň o objemu 106 l.

Podnik v současnosti odebírá přibližně 1 t abraziva měsíčně a to z Austrálie s označením Australian Garnet (australský granát) GMA 80 (stupeň zrnitosti). 1 kg stojí 8 Kč a průměrná spotřeba abraziva je za provozu stroje 90 g/min.

Pro plechy se tu standardně používá abrazivní tryska o průměru 1,09 mm, řezná výška, neboli vzdálenost trysky nad obráběným povrchem, 3-5 mm, průtok vody 4 l/min, pro plechy tloušťky 1,5 mm posuvová rychlost 300-450 mm/min, pro plasty 300 mm/min, pro molitan 3000 mm/min, ten se řeže bez abraziva, mezery mezi výřezky z plechu se tu nastavují na 5 mm. Jelikož voda způsobuje korozi, jdou pak často plechy na broušení hran.

Řeže se tu například ocel, hliník, dural, guma, plasty, občas i sklo nebo kámen. Zařízení je zaměstnáno jednu celou směnu každý pracovní den. Pokud má někdo zájem si nechat na tomto zařízení něco řezat, 1 h práce ho potom přijde na 2000 Kč.

V přílohách se nachází fotodokumentace zařízení pro řezání vodním paprskem z návštěvy uvedeného podniku.

5 VÝVOJ A TRENDY TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

Díky neustále se rozšiřujícím oblastem využití vodního paprsku se tato technologie neustále zdokonaluje. Stále více firem, pokud ještě touto technologií nedisponují, se začíná o tuto moderní metodu zajímat.

Konstrukční materiály – jejich kvalita neustále roste a ve spojení s dokonalejšími výrobními technologiemi přispívají ke zvýšení životnosti.

Tlak – co se týká běžně používaného tlaku, ten se více než zdvojnásobil a dnes je běžně používaný pracovní tlak 415 MPa. Vodní paprsek tryská nadzvukovou rychlostí 700 - 1200 m/s. Testují se ale tlaky i mnohem vyšší, až 700 MPa. Tak vysokého tlaku můžeme dosáhnout díky stále výkonnějším vodním čerpadlům a možnosti párovat multiplikátory pro ještě další zvýšení. Pro porovnání, tlak, který používají požárníci, je okolo 1 MPa. (3,9)

Řezací hlava – v 90. letech byl vyvinut systém 3D řezací hlavy pro 2D CNC stoly, čímž se rozšíří řezací možnosti na daném zařízení. Data jsou připravena v pěti-osém softwarovém systému.

Tryska – od 90. let se rozšiřuje využití modernějších diamantových trysek, jejich cena je ovšem mnohem vyšší oproti klasickým safírovým nebo rubínovým tryskám. Jejich nevýhodou je nízká životnost způsobená zanášením a znehodnocováním při nárazu abrazivních částic o stěnu trysky. Zato diamantová tryska je odolná proti nárazům mikročástic ve vodě a má tedy mnohanásobnou životnost (v průměru 1000 řezacích hodin) (obr. 5.1). Navíc je možné diamantové trysky čistit ultrazvukovou metodou a mají lepší rozměrovou přesnost a stálost. Původní borkarbidové trysky, jejichž životnost byla do 20 řezacích hodin, jsou tedy již dávno překonané. (13)



Obr. 5.1 Diamantová hlava od firmy PTV, spol. s.r.o. (16)

Velmi zajímavá z novějších metod je **systém ProgressJET** firmy PTV, spol. s.r.o. Slouží k eliminaci nekolmosti řezné hrany a zvýšení dynamiky řezacího procesu. Řezací proces se zrychlí a zpřesní. Důvody nepřesnosti řezné hrany:

- zužující se řezná spára směrem od řezací hydroabrazivní trysky v důsledku ztrát řezací energie při řezacím procesu
- vyšší řezná rychlost způsobuje užší řeznou spáru na výstupní hraně polotovaru
- naopak nižší řezná rychlost způsobuje paralelnost řezných hran, výrobek je sice přesný, ale proces se prodražuje
- další nepřesnosti řezu mohou vznikat v rozích a u malých rádiusů, kdy spodní strana řezu zaostává za horní stranou. Eliminovat tento vliv je možné zpomalením pohybu a nebo zakláněním paprsku v místech změn směru a následným pohybem v zakloněném stavu. Nakloněním řezacího paprsku (náklon musí odpovídat odklonu řezné stěny) se dosáhne při vysoké řezné rychlosti přesnosti výrobku a vzniklá chyba se zdvojnásobí v odpadové části

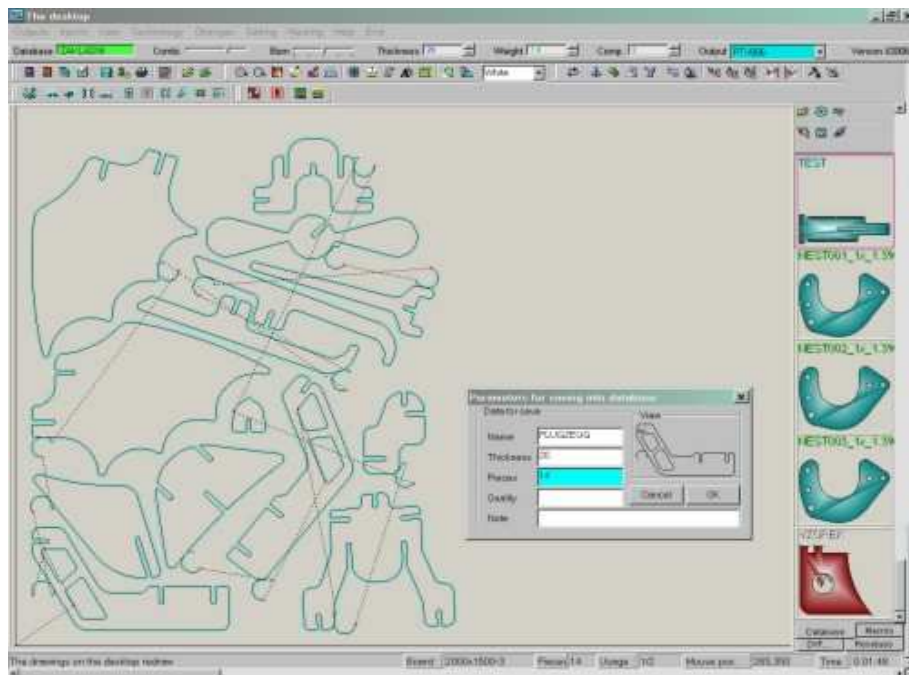
Systém ProgressJET se skládá ze dvou neoddělitelných součástí:

- mechanika systému - umožňuje naklápění řezací hlavy ve dvou rotačních směrech, a v součinnosti s lineárními osami X, Y a Z realizuje všechny potřebné pohyby
- řídicí systém - řídí pohyb všech pěti os a vyhodnocuje optimální dráhu na základě technologických informací zadaných obsluhou

Tento systém je možno namontovat na CNC stoly řady D ProgressJET. Změny oproti standardnímu CNC stolu D jsou:

- nový typ řídicího systému
- nová osa Z s připojenými dvěma rotačními osami

Programy se připravují CAM softwarem Wrykrys (obr. 5.2). (16)



Obr. 5.2 Ukázka uspořádání výřezků v CAM softwaru Wrykrys (16)

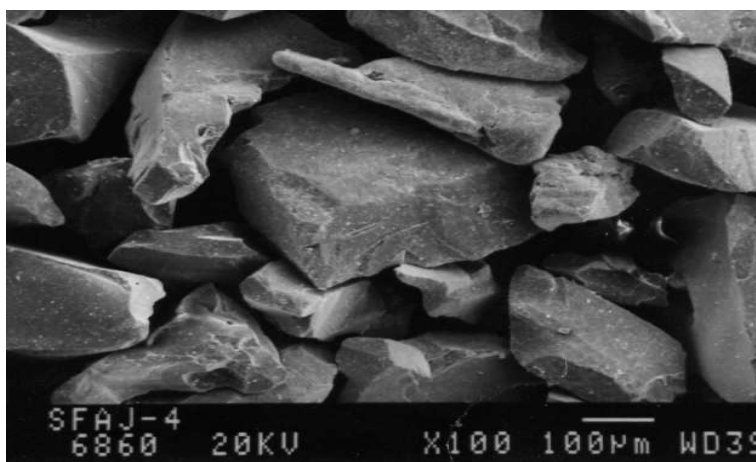
Řezací médium – dnes se již můžeme setkat i s jiným médiem tryskajícím z hlavice. Místo vody se využívají například oleje, glycerin, alkoholy, v potravinářství dokonce i mléko. Médium musí mít dostatečnou čistotu. O těchto médiích se uvažuje tam, kde voda není zcela vhodná, například z důvodu malé korozní odolnosti obráběného materiálu nebo jiné nežádoucí reakce nebo pokud by nebyla vhodná přítomnost vznikajících vodních par. Využívá se také různých přísad a úprav vody.

Abrazivo – mezi abraziva patří karbid křemíku SiC, elektrokorund Al₂O₃, diamantový prach, ale také jemně mletý přírodní granát či smírek. Dnes se používají i jiná abraziva než na bázi polodrahokamů. Zajímavostí je využití takových abraziv, jako jsou cukry, soli, mouky, mletá káva nebo kakaový prášek smíchaný s již zmíněným mlékem. Tato abraziva jsou výhodná pro aplikaci v potravinářském průmyslu. Řezané materiály zde nejsou tak tvrdé a na abrazivu je možno i ušetřit. Vývoj se nevyhnul i možnostem přísunu abraziva. Od podtlakového přísávání se začalo přecházet k tlakovému podávání a to tlakem okolo 0,3 MPa. Velikost abraziva se pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,5 mm (17). Druh použitého abraziva velmi ovlivňuje životnost trysek. (3)

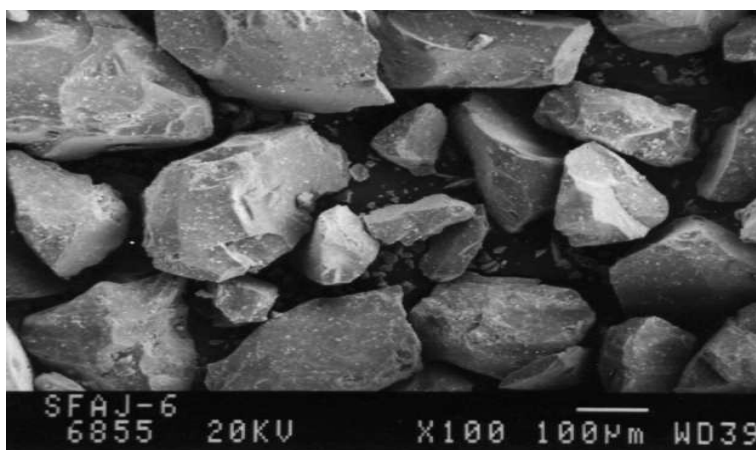


Obr. 5.3 Koncentrát připravený z granátu almandinu pro použití v technologii abrazivního vodního paprsku (30)

Použité abrazivo zachycené v lapači vodního paprsku pod řezacím stolem se může dát dnes recyklovat (obr. 5.4 a 5.5). Tímto se zabývají například firmy AQUAdem, spol. s.r.o. a PTV, spol. s.r.o.



Obr. 5.4 Původní abrazivo (23)



Obr.5.5 Recyklované abrazivo (23)

V přílohách se nachází příklad abraziva a recyklační jednotky na abrazivo v současnosti nabízené firmou PTV s.r.o.

Senzorika – důležitým prvkem je výškový senzor, který zabraňuje nárazu trysky do obráběného materiálu (obr. 5.6). Dříve se tak díky absenci tohoto senzoru mohlo stát, že se tryska poškodila, neboť se pohybuje velmi blízko nad řezaným povrchem. Výškový senzor je ovládán pneumaticky. Hlídá automaticky optimální vzdálenost trysky od nerovného řezaného materiálu. Chrání trysku pomocí obruče, která při dotyku s tělesem vydá signál do CNC řízení a zabrání tak nárazu a následnému možnému poškození, které by při vysokých cenách trysek bylo velmi nežádoucí. (16)



Obr.5.6 Výškový senzor firmy PTV, spol. s.r.o. (16)

Mezi další senzory patří senzory tlakové, které v případě poruchy potrubí okamžitě vypnou čerpadlo. (3)

Výkon vodního paprsku se pohybuje od 7 do 45 kW. (10,12)

Vývoj technologie není zdaleka u konce a bude neustále pokračovat. Jedněmi z nejdůležitějších parametrů ve vývoji jsou kvalita a výrobní cena, kterou je potřeba se snažit v dnešním konkurenčním světě co nejvíce snížit.

ZÁVĚR

Přednosti, které technologie vodního paprsku nabízí, jsou srovnatelné s málokterou jinou technologií dělení materiálu. Perspektivy vývoje a použití značí mimořádnou univerzálnost a progresivnost této metody. Přes všechny výkonnostní parametry je důležitá i ekologičnost této moderní technologie.

Všeobecně je dnes technologie vodního paprsku považována za jednu z nejflexibilnějších s velmi širokým využitím. Takřka nenahraditelná je tato metoda při obrábění materiálů, které jsou konvenčními způsoby těžko obrobitelné, nebo potřebujeme-li dělit studeným řezem.

Mezi nekonvenčními technologiemi má ve strojírenství vodní paprsek přední místo a výrobní podniky, které zatím dané zařízení nevlastní, by se měly vážně zajímat o jeho výborné možnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Abrasive-jet and Water-jet machining on the Web [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.waterjets.com>> .
2. AWAC, spol. s.r.o., systémy dělení materiálu [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.awac.cz>> .
3. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*, Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992. ISBN 80-7082-518-9.
4. DVOŘÁKOVÁ, J. a DVOŘÁK, J. *Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem* [online]. Technika, technologie - vydání 21/2007, Dostupné na World Wide Web: <<http://www.glassrevue.com/>> .
5. DVOŘÁKOVÁ, J. a DVOŘÁK, J. *Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II.* [online]. Technika, technologie - vydání 15/2008, Dostupné na World Wide Web: <<http://www.glassrevue.com/>> .
6. Flow International Corporation [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.flowcorp.com>> .
7. HASHISH, M. *An Investigation of Milling with Abrasive – Waterjet*, ASME J. of Engineering for Industry, Vol 111, May 1989.
8. HLAVÁČ, I. *Makroskopický fyzikální popis interakce kapalinového paprsku vysoké energie s materiálem*, Praha: ČVUT, 2006, ISBN 80-01-03465-8.
9. KARAFIÁTOVÁ, S. a LANGER, I. *Nekonvenční technologie*, Havlíčkův Brod: Fragment, 1998, ISBN 80-7200-296-1.
10. KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi*, WJM Bratislava, 1998, ISBN 80-8057-091-4.
11. KOLB, M. *Řezání kapalinovým paprskem: Zisková alternativa*. MM Průmyslové spektrum, roč. XII., č. 3, s.50-51, 2009, ISSN 1212-2572.
12. MAŇKOVÁ, I. *Progresívne Technológie*, TU Košice Strojnícka fakulta, 2000, ISBN 80-7099-430-4.
13. MM Průmyslové spektrum, Strojírenský měsíčník [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/>> .
14. MOMBER, A. *Aktuelle Probleme der Abrasiv-Wasserstrahl-Bearbeitung*, wt Werkstattstechnik 81, 1991.
15. MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*, Plzeň: ZČU Plzeň, 1999, ISBN 80-7082-518-9.

16. PTV, s.r.o. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ptv.cz>> .
17. ŘASA, J. *Strojírenská technologie 3, 2.díl*, Scientia, 2005, ISBN: 80-7183-227-8.
18. SLANÝ, M. *Obrábění vodním paprskem: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 68s.
19. VAN LUTTERVELT, C.A. *On the Selection of Manufacturing Methods Illustrated by an Overview of Separation Techniques for Sheet Materials*, Annals of the CIRP Vol. 39/2, 1989.
20. WILKINS, R.J., GRAHAM, E.E. *An Erosion Model of Waterjet Cutting*, ASME J. of Engineering for Industry, Vol 115, Feb. 1993.
21. ZUKOV, spol. s.r.o. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.zukov.cz>> .
22. AQUAdem, spol. s.r.o. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://aquadem.cz/>> .
23. URBÁNEK, J.,F. *Teorie procesů – management prostředí*, Nakladatelství CERM Brno, 2001.
24. Plehaso, řezání vodním paprskem a laserem [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.plehaso.cz/>> .
25. Mička Roman, umělecko-řemeslné zpracování kovu [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.rm-kov.cz/>> .
26. JIT WATERJET [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.jitwaterjet.com/>> .
27. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*, 1. vyd., Brno: Akademické nakladatelství CERM 2001, 270s., ISBN 80-214-1996-2.
28. TRUMF Inc. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://http://www.us.trumpf.com/>> .
29. HAMMELMANN Corporation [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.hammelmann.com/>> .
30. Institute of Geonics AS CR [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ugn.cas.cz/>> .

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Fotodokumentace zařízení pro řezání vodním paprskem z návštěvy podniku E-COM
Příloha 2	Příklad CNC stolu pro řezání vodním paprskem v současnosti nabízeného firmou PTV s.r.o.
Příloha 3	Příklad čerpadla v současnosti nabízeného firmou PTV s.r.o.
Příloha 4	Příklad abraziva pro technologii AWJ v současnosti nabízeného firmou PTV s.r.o.
Příloha 5	Příklad recyklační jednotky na abrazivo v současnosti nabízené firmou PTV s.r.o.